

SWU Engineering Journal (2013) 8(2), 11-20

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม พ.ศ.2556

## ผลของเวลาในการอบอสเทนไนท์ต่อการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุของ เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

### Effects of Austenitizing Time on Three – Body Type Abrasion Wear Behavior of Austempered Ductile Iron

วัฒนพร ชนไฮ และ อุษณีย์ กิตกำธร

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: k\_usanee@sut.ac.th, f\_ny@windowslive.com

#### บทคัดย่อ

ในการอบชุบออสเทมเปอร์เหล็กหล่อเหนียวนั้น การอบอสเทนไนท์ด้วยเวลาต่างกันทำให้ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์รอบๆ แกรไฟต์กลมต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการชุบแข็งและการเปลี่ยนเฟสของออสเทนไนต์ไปเป็นออสเฟอไรต์รวมทั้งสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของเวลาในการอบอสเทนไนท์ซึ่งมีต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีและความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอสเทนไนท์ การทดลองเริ่มจากการนำเหล็กหล่อเหนียวไปอบอสเทนไนท์ที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที แล้วชุบออสเทมเปอร์ลงในเกลือหลอมเหลวที่ 280 และ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 90 และ 120 นาที จากนั้นจึงตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบความแข็ง ทดสอบความต้านทานการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบขัดสีล้อย่างตามมาตรฐาน ASTM G65 (ชนิดสามวัตถุ) และตรวจสอบพื้นผิวภายหลังการขัดสี ผลการศึกษาพบว่าปริมาณการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ลดลงเมื่อใช้เวลาอบอสเทนไนท์นานขึ้นจาก 30 ไปเป็น 60 และ 90 นาที การอบอสเทนไนท์ด้วยเวลาเพียง 30 นาที ถือว่าสั้นเกินไป เนื่องจากยังพบเฟอไรต์ประเภท allotriomorph อยู่ในโครงสร้างพื้นผิว ทำให้ความแข็งต่ำสุดและเกิดการสึกหรอมากที่สุด พื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบแสดงให้เห็นว่ากลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะของการเกิดรอยแตก รอยไถ และรอยเฉือน โดยพบว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นมาจากรอยต่อระหว่างแกรไฟต์และเนื้อพื้น

**คำสำคัญ:** ออสเทนไนท์ ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

#### ABSTRACT

In ductile iron austempering treatment, carbon concentration in austenite during austenitizing at a constant temperature is controlled by austenitizing time. The carbon concentration in austenite also plays role in hardenability, phase transformation into ausferrite and thus the mechanical properties of austempered ductile iron (ADI). In order to determine the proper austenitizing time, the effects of austenitizing time on abrasion wear resistance and hardness of austempered ductile iron (ADI) were studied. The heat treatment was carried out by austenitizing at 900 °C for 30, 60 and 90 minutes and then austempering at 280 °C and 360 °C for 60, 90, and 120 minutes, respectively. The microstructure

of austempered specimens were investigated. Brinell hardness of all samples was tested. Abrasion wear test was conducted according to ASTM G65 three – body type dry sand/rubber wheel abrasion testing. Worn surfaces were also observed. The results showed that volume losses of ADI decreased with increasing of austenitizing time from 30, 60 to 90 minutes. Austenitizing for 30 minutes was not enough to suppress the formation of allotriomorph ferrite. Therefore, the lowest hardness and the highest volume loss were found in specimens austenitized for 30 minutes. Moreover, worn surface revealed the wear mechanisms involving cracking, plowing and shearing. Cracks were found to initiate in the matrix at the graphite/matrix interface.

**Keyword:** Austenitizing, Abrasive Wear, Austempered Ductile Iron

## 1. บทนำ

เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมสามารถนำมาผ่านการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกรรมวิธีการอบชุบออสเทมเปอร์ แล้วเรียกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Quenching & Tempering) ซึ่งให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ 600-1,000 MPa ในขณะที่เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ให้ค่าความต้านทานแรงดึง 750-1,600 MPa สามารถทนต่อแรงกระแทก แรงบิดและการขัดสีได้สูง [1] จึงเหมาะกับการนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์และจักรกลการเกษตร เช่น เฟืองเกียร์ ตัวชุดดินในรถไถและล้อเฟืองรถเกี่ยวข้าว เป็นต้น การอบชุบออสเทมเปอร์ ประกอบด้วยการอบออสเตไนท์ที่ 850-950°C เป็นเวลา 30-90 นาที และการชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิคงที่ในช่วง 260-400°C เป็นเวลา 60-120 นาที ขั้นตอนการอบออสเตไนท์ที่อุณหภูมิสูงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อเหนียวจากเฟอร์ไรต์ผสมเฟิร์ลไลต์ให้กลายเป็นออสเตไนต์ทั้งหมดและเพิ่มปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง คาร์บอนจากแกรไฟต์จะแพร่เข้าไปในออสเตไนต์ระหว่างการอบออสเตไนท์ที่ซึ่งซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยเวลา ดังนั้นเวลาในการอบออสเตไนท์จึงมีผลต่อปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์ก่อนที่จะชุบลงมาที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ โครงสร้างพื้นเริ่มต้นเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อเวลาในการ

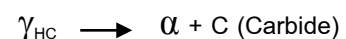
อบออสเตไนท์ที่ซึ่งที่เหมาะสม ถ้ามีเฟอร์ไรต์ในเนื้อพื้นเดิมมากก็ต้องใช้เวลาอบออสเตไนท์ที่ซึ่งนาน สำหรับการชุบออสเทมเปอร์นั้น โครงสร้างจุลภาคเนื้อพื้นที่ต้องการคือ“ออสเฟอร์ไรต์ (ausferrite)” ซึ่งประกอบด้วยเฟอร์ไรต์รูปเข็มสลับกับออสเตไนต์เหลือค้ำที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ระหว่างการชุบออสเทมเปอร์จึงเหล็กหล่อเหนียว ปฏิบัติการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้น 2 ชั้น ดังนี้

ชั้นที่ 1 ออสเตไนต์เริ่มต้น ( $\gamma_0$ ) เปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มแหลม ( $\alpha$ ) กับออสเตไนต์ที่มีคาร์บอนสูง ( $\gamma_{HC}$ )



หากปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์ที่ได้จากปฏิกิริยาชั้นที่ 1 นั้นสูงพอ เมื่อปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวจะคงเป็นออสเตไนต์เหลือค้ำ แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนไม่สูงพอเนื่องจากใช้เวลาออสเทมเปอร์สั้นเกินไป เมื่อชิ้นงานเย็นจะเกิดมาร์เทนไซต์อยู่ภายในออสเตไนต์

ชั้นที่ 2 ออสเตไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ( $\gamma_{HC}$ ) เปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์



โดยปฏิกิริยาชั้นที่ 2 จะเกิดขึ้นในกรณีที่ชุบออสเทมเปอร์นานเกินไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวและอุณหภูมิออสเทมเปอร์

การขัดสีเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการที่วัสดุที่มีความแข็งสูงกว่าเคลื่อนที่ไปบนวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่าด้วยแรงเสียดทานจนเป็นผลให้เกิดการสึกหรอบนพื้นผิววัสดุ [2] โครงสร้างออสเฟอไรต์ที่ประกอบด้วยซีเมนต์เฟอไรต์สลับกับออสเตไนต์เหล็กล้างคาร์บอนสูงช่วยให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทนต่อการขัดสีได้ดีกว่าเหล็กหล่อเหนียวทั่วไป เนื่องจากความเครียดสะสมที่เกิดจากการขัดสีระหว่างการใช้งานทำให้ออสเตไนต์เหล็กล้างคาร์บอนสูงเปลี่ยนเฟสไปเป็นมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูง (strain-induced martensite) จึงมีความต้านทานการสึกหรอดีขึ้นระหว่างการใช้งาน [3] ปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ก็คือปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เริ่มต้น ( $\gamma_0$ ) ซึ่งได้จากการอบออสเตไนไทซิง [4] ถ้ามีค่าน้อยเกินไปก็อาจชุบออสเทมเปอร์แล้วได้เฟอไรต์และเฟิร์ลไลต์ปนมาด้วย เนื่องจากความสามารถในการชุบแข็งต่ำ

ในด้านสมบัติความต้านทานการขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ Francucci และคณะ [5] ได้ศึกษาความต้านทานการขัดสีแบบล้อของเหล็กหล่อเหนียวที่ชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้น โดยพบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่มีความแข็งสูงสามารถต้านทานการเสียดสีภายใต้สภาวะความเค้นต่ำได้ดีกว่า แต่เมื่อนำไปทดสอบกับการใช้งานเล็ชชุดดินซึ่งใช้งานในสภาวะที่มีความเค้นสูงกลับพบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่มีความเหนียวมากจะสามารถทนต่อการขัดสีได้ดีกว่า

Sahin และคณะ [6] ศึกษาการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวที่อบออสเตไนไทซิงในช่วงระหว่างอุณหภูมิวิกฤตซึ่งมีโครงสร้าง 2 เฟส ( $\alpha+\gamma$ ) จากนั้นชุบออสเทมเปอร์ที่ 365 °C ด้วยระยะเวลาต่างๆ เพื่อให้ได้เหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณออสเฟอไรต์แตกต่างกัน แล้วเทียบกับชิ้นงานที่ชุบออสเทมเปอร์แบบปกติ ผลงานวิจัยพบว่าชิ้นงานที่มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟอไรต์และออสเฟอไรต์มีการสึกหรอมากกว่าชิ้นงานที่มีโครงสร้างพื้นเป็นออสเฟอไรต์ทั้งหมดที่ได้

จากการชุบออสเทมเปอร์ปกติและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณออสเฟอไรต์มากขึ้น

เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบออสเตไนไทซิง การศึกษาจึงให้ความสนใจไปที่ผลของเวลาในการอบออสเตไนไทซิงต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี และความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ เนื่องจากเวลาอบออสเตไนไทซิงส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เริ่มต้น ( $\gamma_0$ ) ซึ่งทำให้โครงสร้างพื้นและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวหลังชุบออสเทมเปอร์จึงแตกต่างกันได้

## 2. วิธีการทดลอง

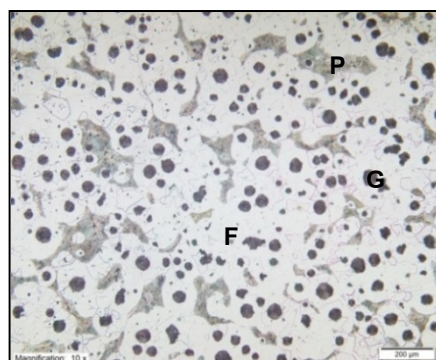
ขั้นตอนการทดลองแสดงเป็นผังดังในรูปที่ 1 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 วัตถุดิบ

การทดลองนี้ใช้เหล็กหล่อเหนียวที่มีส่วนผสมทางเคมีดังในตารางที่ 1 และมีโครงสร้างพื้นเป็นเฟอไรต์และเฟิร์ลไลต์ดังรูปที่ 1 โดยหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแท่ง Y-block ขนาด 1 นิ้ว [7] เหล็กหล่อที่ได้มีจำนวนแกรไฟต์กลมเฉลี่ย 102 เม็ดกลมต่อตารางมิลลิเมตร

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ

ส่วนผสมทางเคมี (wt%)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg
3.44	2.66	0.03	0.03	0.009	0.026	0.06



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลม (G-แกรไฟต์ P-เฟิร์ลไลต์ F-เฟอไรต์)

## 2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ตัดชิ้นงานออกจากส่วนล่างของ Y-block เพื่อเตรียมขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบการขัดสี โดยตัดให้มีขนาดเริ่มต้น 25 x 75 x 14 มม. เพื่อนำไปอบชุบ ออสเทมเปอร์ริงก่อนที่จะกลึงไสจนได้ขนาดสุดท้าย เป็น 25 x 65 x 12 มม. ดังในรูปที่ 2 จากนั้นขัดผิวชิ้นงานมีความเรียบผิวประมาณ 0.8 ไมโครเมตร

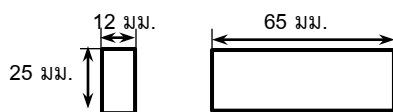
## 2.3 กรรมวิธีทางความร้อน

การอบชุบออสเทมเปอร์ริงประกอบด้วยการอบออสเตไนท์ที่ 900 °C เป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที จากนั้นทำให้เย็นตัวลงด้วยการชุบลงในอ่างเกลือ หลอมเหลวที่ 280 °C และ 360 °C แช่ทิ้งไว้ 60 90 และ 120 นาที แล้วยกขึ้นเย็นในอากาศดังแสดงด้วย แผนภาพในรูปที่ 3 กำหนดรหัสชื่อชิ้นงานตาม อุณหภูมิออสเตไนท์-อุณหภูมิออสเตไนท์ (อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริง-เวลาออสเทมเปอร์ริง) เช่น 900-30(280-60)

## 2.4 การทดสอบ

### 2.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

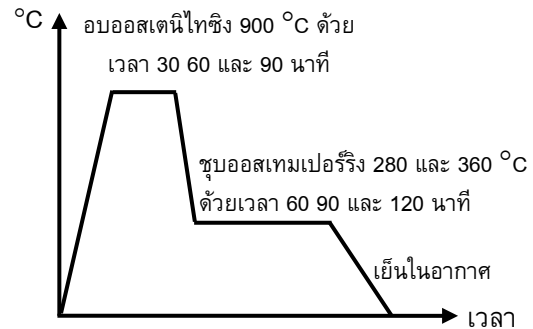
ภายหลังการอบชุบออสเทมเปอร์ริงได้เตรียมผิวชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยเริ่มจากการขัดหยาบและขัดละเอียดตามลำดับ แล้วกัดกรดด้วย ไนตริก 2 % เป็นเวลา 5 วินาที ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อนและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 2 ขนาดของชิ้นงานทดสอบการขัดสี

### 2.4.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งใช้วิธีการบริเนลล์ด้วยเครื่องทดสอบ Wilson รุ่น Dead Weight MJ ใช้แรงกดที่เกิดจากตุ้มน้ำหนัก 3,000 กิโลกรัม และลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. ระยะเวลาในการกด 10 วินาที ทดสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อชิ้นงาน แล้วหาค่าเฉลี่ย



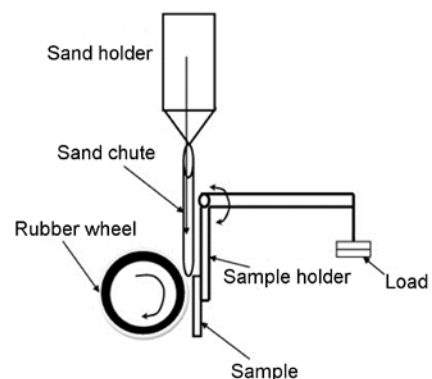
รูปที่ 3 แผนภาพกระบวนการอบออสเทมเปอร์ริง

### 2.4.3 การทดสอบการขัดสีชนิดสามวัตถุ

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบการขัดสีทรายแห้ง/ล้อยางชนิดสามวัตถุ (dry sand rubber wheel abrasion test) ดังรูปที่ 4 โดยใช้ทรายแก้วขนาด 50 mesh เป็นตัวขัดสีระหว่างชิ้นงานทดสอบกับล้อยางที่หมุนอยู่ ใช้แรงกดชิ้นงานขนาด 130 นิวตัน ล้อยางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 226.8 มม. หมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีในทิศทางเดียวกับการไหลของทราย อัตราการไหลของทรายถูกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 300-400 กรัมต่อนาที จำนวนรอบในการทดสอบ 2,000 รอบต่อครั้ง ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีถูกแสดงเป็นปริมาตรที่หายไปจากการทดสอบ ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$\text{ปริมาตรการสึกหรอ} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานที่สูญเสียไป}}{\text{ความหนาแน่นของชิ้นงาน}}$$

การทดลองทำซ้ำ 2 ตัวอย่าง แต่ละซ้ำให้ผลการทดลองแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 5 แล้วรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบการขัดสีล้อยางชนิดสามวัตถุ

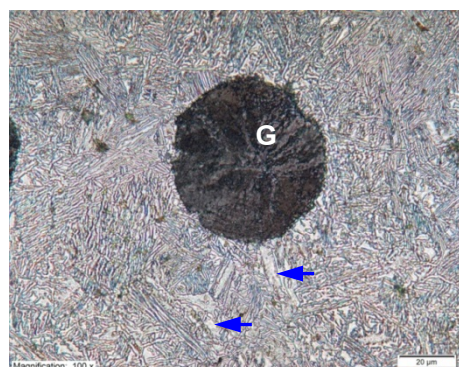
### 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 โครงสร้างจุลภาค

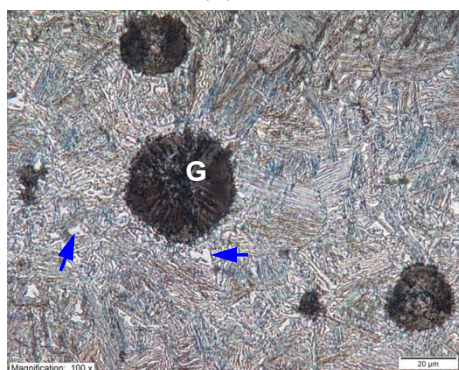
โครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังการชุบออสเทมเปอร์ประกอบด้วย แกรไฟต์กลมและโครงสร้างเฟอไรต์ ซึ่งในออสเฟอไรต์ประกอบไปด้วยเฟอไรต์รูปเข็มแหลมสลับกับออสเตไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ในชุดการทดลองที่อบออสเตไนต์ซึ่งเหมือนกันแต่ใช้เวลาในการชุบออสเทมเปอร์ต่างกัน เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อนพบว่า มีลักษณะคล้ายกันเนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคที่ไม่สามารถแยกแยะมาร์เทนไซต์ที่อยู่ในออสเตไนต์เหลือค้างได้ (resolution limit) แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชิ้นงานที่ชุบออสเทมเปอร์เหมือนกัน แต่ออบออสเตไนต์ซึ่งต่างกัน โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อบออสเตไนต์ซึ่งเป็นเวลาสั้น ๆ คือ 30 นาที มีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) เนื่องจากยังมีกลุ่มก้อนสีขาวอยู่มาก ซึ่งเป็นออสเตไนต์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส (Untransformed Austenite) ผสมกับเฟอไรต์ประเภท allotriomorph ออสเตไนต์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสบางส่วนนี้กลายเป็นมาร์เทนไซต์เมื่อเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ส่วนโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อบออสเตไนต์ซึ่งด้วยเวลา 60 และ 90 นาทีนั้น มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ปริมาณกลุ่มก้อนสีขาวลดลง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชิ้นงานที่อบออสเตไนต์ซึ่งด้วยเวลาเท่าๆกัน แต่อุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์ต่างกันคือ 280 และ 360°C เฟอไรต์รูปเข็มแหลมมีลักษณะหยาบขึ้นเมื่ออุณหภูมิออสเทมเปอร์สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 ทั้งนี้เนื่องจากการชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่าย่อมมีอัตราการคูลลิ่งน้อยกว่า จำนวนนิวเคลียสของเข็มเฟอไรต์จึงน้อยทำให้ได้ออสเฟอไรต์หยาบ

#### 3.2 ความแข็ง

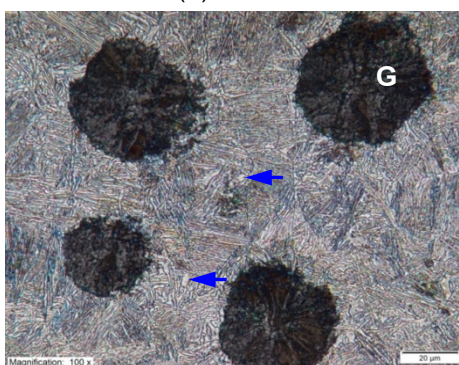
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งพบว่า เหล็กหล่อเหนียวที่ได้จากการชุบออสเทมเปอร์ที่ 280°C เป็นเวลา 60 และ 90 นาทีนั้น การเปลี่ยนเฟส



(ก) 30 นาที



(ข) 60 นาที



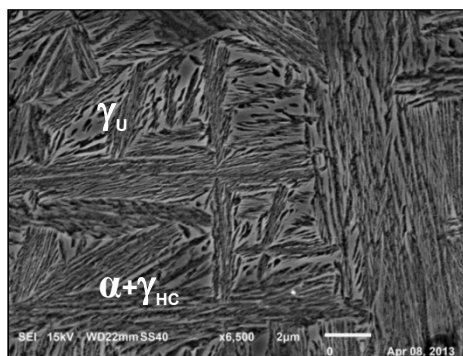
(ค) 90 นาที

รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตไนต์ซึ่งด้วยเวลาต่างกันคือ 30 60 และ 90 นาที และชุบออสเทมเปอร์ที่ 360 °C ด้วยเวลา 60 นาที (ลูกศรชี้ตัวอย่างของกลุ่มก้อนสีขาว)

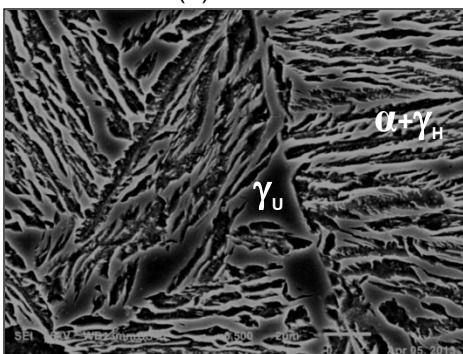
จากออสเตไนต์เริ่มต้นไปเป็นออสเฟอไรต์ยังไม่สิ้นสุด ดังสังเกตได้จากค่าความแข็งที่ลดลงเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์นานขึ้น ซึ่งขณะที่ชุบออสเทมเปอร์นั้น ออสเตไนต์จะเปลี่ยนไปเป็นออสเฟอไรต์ โดยในช่วงเริ่มต้นนิวเคลียสเฟอไรต์จะเกิดรอบๆ แกรไฟต์กลม



เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีคาร์บอนน้อยและมีซิลิคอนสูง ทำให้เกิดเฟอไรต์ได้ง่าย โครงสร้างออสเฟอไรต์จะโตต่อไปเรื่อยๆ ในออสเตไนต์ หากการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเฟอไรต์ถูกทำให้หยุดก่อนการเปลี่ยนเฟสสมบูรณ์ (เวลาชุบออสเทมเปอร์สั้น) ออสเตไนต์ที่เหลืออยู่บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์เมื่อเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์ไม่เพียงพอที่จะทำให้ออสเตไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้องได้ [8] เมื่อเพิ่มเวลาชุบออสเทมเปอร์ให้มากขึ้นเป็น 90 และ 120 นาที ปริมาณออสเฟอไรต์ย่อมเพิ่มขึ้นและปริมาณออสเตไนต์ที่ยังไม่เปลี่ยนเฟสลดลง นอกจากนี้ออสเตไนต์ที่อยู่ภายในออสเฟอไรต์ก็มีคาร์บอนสูงขึ้น จึงมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้องได้ ดังนั้นในโครงสร้างจุลภาคจึงมีปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง ค่าความแข็งจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

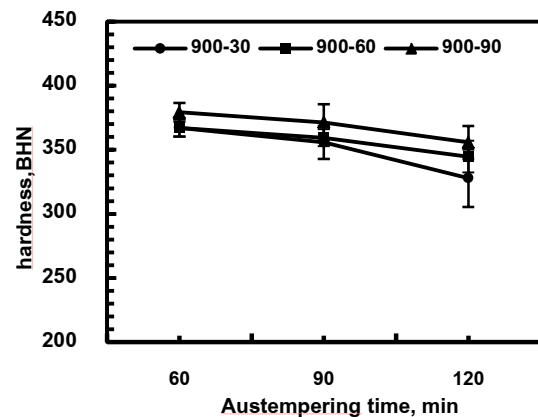


(ก) 280 °C



(ข) 360 °C

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตไนต์ไชงด้วยเวลา 60 นาที และชุบออสเทมเปอร์ด้วยเวลา 60 นาที ( $\gamma_U$  คือ ออสเตไนต์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส ส่วน  $\alpha+\gamma_{HC}$  คือออสเฟอไรต์)

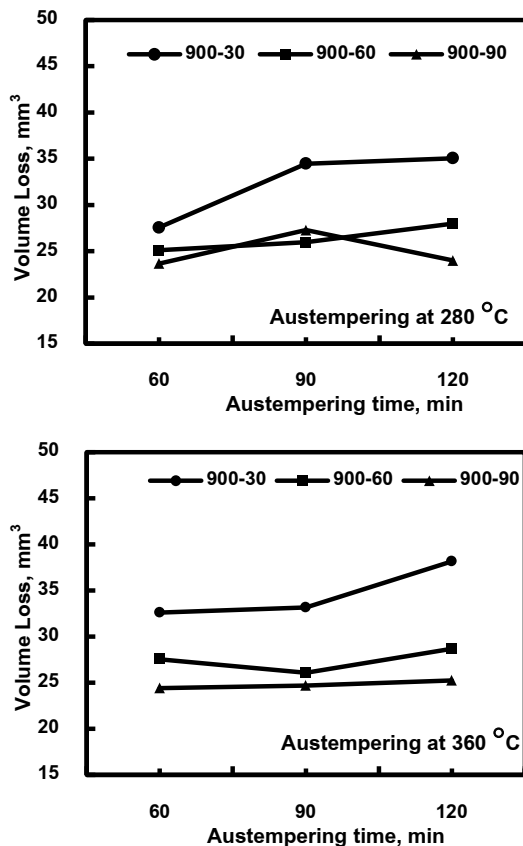


รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความแข็งเทียบกับเวลาการชุบออสเทมเปอร์ที่ 280 °C

### 3.3 ความต้านทานการขัดสี

3.3.1 ปริมาณการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ได้จากการอบออสเตไนต์ไชงด้วยเวลาต่างกัน

ผลการทดสอบการขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวในชุดการทดลองที่ชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิต่างกันคือ 280 °C และ 360 °C แสดงดังในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าปริมาณการสึกหรอไม่แตกต่างกันมากนัก โดยอยู่ในช่วง 23 – 38 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และเมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่อบออสเตไนต์ไชงเป็นเวลาสั้นคือ 30 นาที (วงกลม ●) พบว่าเกิดการสึกหรอมากที่สุด ซึ่งเป็นไปได้ว่า เวลาการอบออสเตไนต์ไชงสั้นทำให้ออสเตไนต์เริ่มต้นบางส่วนมีปริมาณคาร์บอนน้อยความสามารถในการชุบแข็งจึงต่ำ ระหว่างที่ชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวจึงมีบางส่วนเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์ประเภท allotriomorph ดังในรูปที่ 9 เฟอไรต์ประเภทดังกล่าวมีความแข็งต่ำ จึงเกิดการสึกหรอง่าย และยังพบว่าในชุดการทดลองที่อบออสเตไนต์ไชงเป็นเวลาสั้นเพียง 30 นาทีนี้ เมื่อชุบออสเทมเปอร์ด้วยเวลาเพียง 60 นาที ปรากฏว่าปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุด ซึ่งน่าจะเป็นไปได้ว่า ภายในออสเฟอไรต์มีมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นมาก เนื่องจากคาร์บอนแพร่จากซีเมนต์เฟอไรต์เข้าไปในออสเตไนต์รอบๆ ได้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ออสเตไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้อง เมื่อปล่อย

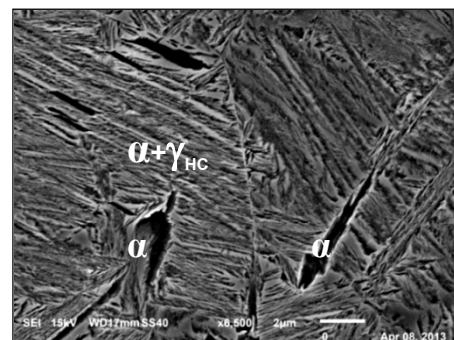


รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับเวลาชุบออสเทมเปอร์ริง โดยอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงเป็น 280°C (บน) และ 360°C (ล่าง)

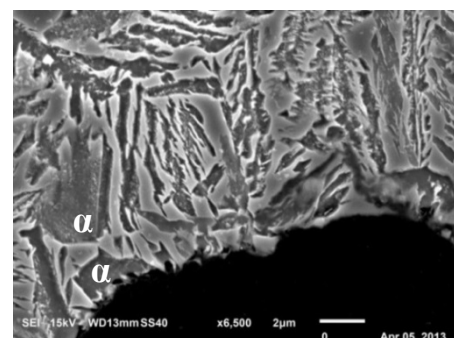
ชิ้นงานเป็นตัวยาวหลังชุบออสเทมเปอร์ริงจึงเกิดมาร์เทนไซต์อยู่ภายในออสเฟอไรต์ และเมื่อใช้เวลาชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น ปริมาตรการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากคาร์บอนแพร่จากเข็มเฟอไรต์เข้าไปในออสเตไนต์รอบๆ ได้มากขึ้น ออสเตไนต์จึงมีเสถียรภาพมากขึ้นและปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง สอดคล้องกับค่าความแข็งที่ลดลง ต่อมาเมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่อบออสเตไนต์ไทม์นานขึ้นเป็น 60 (■) และ 90 นาที (▲) พบว่าปริมาตรการสึกหรอลดลงเนื่องจากเวลาอบออสเตไนต์ไทม์นานขึ้น ออสเตไนต์เริ่มต้นก็มีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น จึงไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอไรต์ประเภท allotriomorph

หากเปรียบเทียบผลของเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริง พบว่า ในชุดการทดลองที่อบออสเตไนต์ไทม์ 30 และ 60 นาที ปริมาตรการสึกหรอก็มีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นเมื่อชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการมีมาร์เทนไซต์ในชิ้นงานที่ชุบออสเทมเปอร์ริงสั้น ส่วนชุดการทดลองที่อบออสเตไนต์ไทม์นาน 90 นาทีนั้น ถ้าอุณหภูมิชุบออสเทมเปอร์ริงเป็น 360°C พบว่า เวลาการชุบออสเทมเปอร์ริงที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ปริมาตรการสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนมากนัก แต่ถ้าอุณหภูมิชุบออสเทมเปอร์ริงเป็น 280°C พบว่า ปริมาตรการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้นจาก 60 เป็น 90 นาที แล้วลดลงเมื่อเวลานานขึ้นเป็น 120 นาที โดยการลดลงในช่วงนี้อาจเป็นผลมาจากการเข้าสู่ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสขั้นที่ 2 ซึ่งออสเตไนต์คาร์บอนสูงเริ่มแตกตัวให้คาร์ไบด์กับเฟอไรต์ ทำให้ความแข็งแรงลดลงและความต้านทานการขัดสีก็ลดลงด้วย



(ก) 280 °C

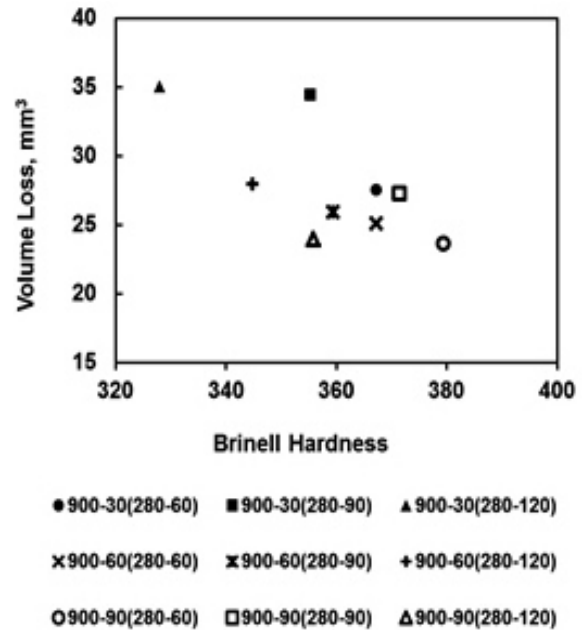


(ข) 360 °C

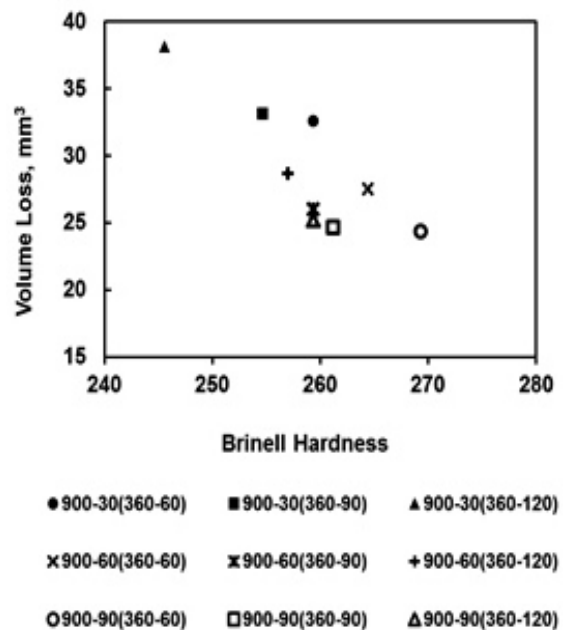
รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่อบออสเตไนต์ไทม์ด้วยเวลา 30 นาทีแล้วชุบออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลา 60 นาที ( $\alpha + \gamma_{Hc}$  คือออสเฟอไรต์ และ  $\alpha$  คือ เฟอไรต์ประเภท Allotriomorph)

### 3.3.2 ปริมาณการสึกหรอเทียบกับความแข็ง

เมื่อนำเอาค่าปริมาณการสึกหรอของทุกชิ้นงานมาพล็อตตามค่าความแข็งของแต่ละชิ้น พบว่าปริมาณการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและยังพบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตไนท์ไชง 30 นาที เกิดการสึกหรอสูงที่สุด โดยที่ปริมาณการสึกหรอสูงขึ้นเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์ขึ้นจนถึงดังในรูปที่ 10-11 ในกรณีของเหล็กหล่อเหนียวที่อบออสเตไนท์ไชงด้วยเวลา 30 นาที พบว่ายังมีออสเตไนต์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ที่อุณหภูมิห้องเล็กน้อยและเกิดเฟอไรต์ประเภท allotriomorph จำนวนมาก เมื่อเวลาอบออสเตไนท์ไชงนานขึ้น พบว่าปริมาณการสึกหรอลดลงเนื่องจากออสเตไนต์เริ่มต้นมีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น จึงมีความสามารถในการชุบแข็งสูงและไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอไรต์ประเภท allotriomorph ทั้งนี้สิ่งที่สังเกตได้อีกคือบางชิ้นงานที่แม้ว่าจะมีความแข็งใกล้เคียงกันแต่ก็พบว่าปริมาณการสึกหรอต่างกันมาก เช่น ชิ้นงานที่อบออสเตไนท์ไชง 30 นาที แล้วชุบออสเทมเปอร์ที่ 280°C ด้วยเวลา 90 นาที (■ ในรูปที่ 10) กับชิ้นงานที่อบออสเตไนท์ไชง 90 นาที แล้วชุบออสเทมเปอร์ที่ 280°C ด้วยเวลา 120 นาที (Δ ในรูปที่ 10) มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันแต่ชิ้นที่อบออสเตไนท์ไชงนาน 90 นาที ให้ปริมาณการสึกหรอต่ำกว่ามาก ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน ชิ้นงานที่อบออสเตไนท์ไชงสั้น (30 นาที) มีปริมาณมาร์เทนไซต์มากแต่ก็มีเฟอไรต์ประเภท allotriomorph อยู่ด้วย ความต้านทานการสึกหรอจึงต่ำ ส่วนชิ้นงานที่อบออสเตไนท์ไชงนาน (90 นาที) ไม่มีเฟอไรต์ประเภท allotriomorph และมาร์เทนไซต์แล้วแต่โครงสร้างพื้นทั้งหมดเป็นออสเฟอไรต์ ทำให้มีความแข็งใกล้เคียงกับชิ้นดังกล่าว โครงสร้างจุลภาคออสเฟอไรต์ที่ภายในมีเฟสออสเตไนต์คาร์บอนสูงนั้นมีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีดีกว่าโครงสร้างจุลภาคผสมระหว่างเฟอไรต์ allotriomorph กับออสเฟอไรต์ที่ภายในมีมาร์เทนไซต์อยู่ด้วย



รูปที่ 10 ปริมาณการสึกหรอเทียบกับความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวชุบออสเทมเปอร์ที่ 280°C

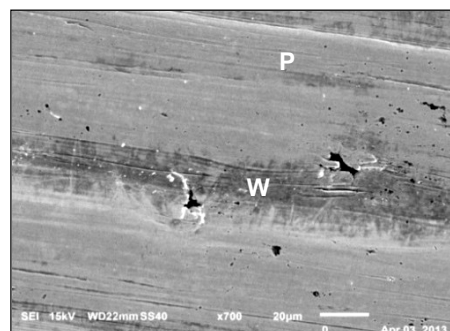


รูปที่ 11 ปริมาณการสึกหรอเทียบกับความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวชุบออสเทมเปอร์ที่ 360°C

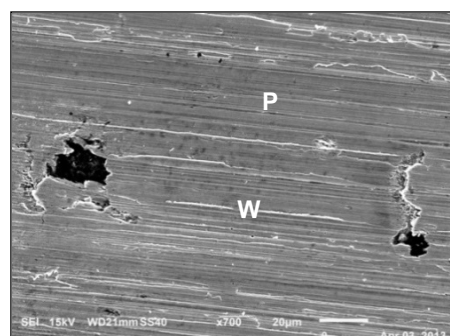


### 3.3.3 พื้นผิวความเสียหายจากการทดสอบความต้านทานการขัดสี

เมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวหลังการขัดสีของชิ้นงานที่มีปริมาตรการสึกหรอน้อยที่สุดกับมากที่สุด แสดงในรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าเหล็กหล่อเหนียวที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด (900-30(360-120)) มีรอยความเสียหายเป็นร่องลึกมากกว่า เนื่องมาจากมีความแข็งต่ำที่สุด ออสเฟอไรต์หยาบกว่า และมีเฟอไรต์ประเภท allotriomorph อยู่ด้วย จึงถูกเม็ดทรายขูดเป็นร่องลึก เหล็กหล่อเหนียวทุกชั้นที่ชุบออสเทมเปอริงที่ 360°C มีรอยการขัดสีที่เป็นร่องลึกกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ชุบออสเทมเปอริงที่ 280°C เนื่องจากการชุบออสเทมเปอริงที่อุณหภูมิสูงกว่า ได้โครงสร้างพื้นเป็นออสเฟอไรต์หยาบกว่า ความแข็งจึงต่ำกว่า อย่างไรก็ตามร่องรอยการขัดสีที่ลึกกว่าไม่ได้สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรการสึกหรอ เช่น ถ้าออสเฟอไรต์หยาบนั้นเป็นออสเฟอไรต์ที่ภายในมีออสเตไนต์เหลือค้างที่มีคาร์บอนสูงก็มีความต้านทานการสึกหรอได้ดี ดังที่เห็นได้ว่าชิ้นงานที่อบออสเตไนท์ไชง 90 นาที แล้วชุบออสเทมเปอริงที่ 280°C และ 360°C ด้วยเวลา 120 นาที ( $\Delta$  ในรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ) ต่างก็มีปริมาตรการสึกหรอใกล้เคียงกันแม้ว่าร่องรอยการสึกหรอจะเป็นรอยลึกแตกต่างกัน รูปแบบความเสียหายที่พื้นผิวนั้นเป็นลักษณะรอยไถ (ploughing) และรอยฉีก (wedge forming) บริเวณเนื้อพื้นเกิดการเสียรูปแบบถาวรหรือการแตกหักจากการขัดสีกันระหว่างเหล็กหล่อเหนียวกับล้อยางโดยมีเม็ดทรายเป็นตัวขัดสี เมื่อสังเกตจากรูปที่ 13 ซึ่งใช้กำลังขยายสูงขึ้น พบว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นมาจากเนื้อพื้นรอบแกรไฟต์ Quanshun และคณะ [9] ก็พบรอยแตกที่เริ่มเกิดขึ้นที่เนื้อพื้นรอบแกรไฟต์จากการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุเช่นกัน แกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำและความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อพื้นกับแกรไฟต์นั้นต่ำ ทำให้ความเข้มของเค้นสูงมากที่เนื้อพื้นรอบๆ แกรไฟต์ ดังนั้นจึงเกิดการเสียรูปแบบถาวรรุนแรงและเกิดการแตกร้าวที่บริเวณดังกล่าว

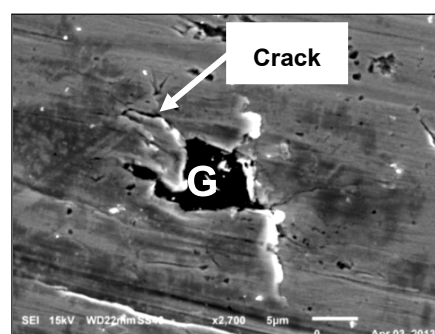


(ก)



(ข)

รูปที่ 12 พื้นผิวการสึกหรอหลังทดสอบการขัดสีของ  
(ก) เหล็กหล่อเหนียว 900-90(280-60) และ  
(ข) เหล็กหล่อเหนียว 900-30(360-120) โดย P คือ  
รอยไถ W คือรอยฉีก



รูปที่ 13 รอยแตกภายหลังทดสอบการขัดสีของ  
เหล็กหล่อเหนียว 900-90(280-60)

## 4. สรุปผลการทดลอง

1. เวลาในการอบออสเตไนท์ไชงมีผลต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอริง โดยความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้นตามเวลาการอบออสเตไนท์ไชงที่นานขึ้น เหล็กหล่อ

เหนียวอสเทมเปอร์ที่อบอสเตไนท์ไซิงเป็นเวลา 90 นาที มีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีดีที่สุด

2. เหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันแต่มีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีต่างกัน เนื่องมาจากโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกันจากการอบชุบทางความร้อนด้วยสภาวะแตกต่างกัน โครงสร้างจุลภาคออสเฟอไรต์ทั้งหมดให้ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีสูงกว่าโครงสร้างจุลภาคผสมระหว่างออสเฟอไรต์ มาร์เทนไซต์และเฟอไรต์ประเภท allotriomorph

3. เหล็กหล่อเหนียวที่มีจำนวนแกรไฟต์เม็ดกลมประมาณ 100 เม็ดต่อตารางมิลลิเมตร และโครงสร้างพื้นหลังการหล่อเป็นเฟอไรต์ผสมเพิร์ลไลต์ ควรใช้เวลาการอบอสเตไนท์ไซิงอย่างน้อย 60 นาที เพื่อให้ออสเตไนต์เริ่มต้นมีความสามารถในการชุบแข็งสูงพอที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดเฟอไรต์ประเภท allotriomorph ได้ ปัจจัยอื่นๆที่สำคัญต่อปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เริ่มต้น เช่น อุณหภูมิการอบอสเตไนท์ไซิง ส่วนผสมทางเคมีเริ่มต้นของเหล็กหล่อ และจำนวนแกรไฟต์ต่อตารางมิลลิเมตร ควรได้รับการศึกษาวิจัยต่อไป เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

4. รูปแบบความเสียหายบนพื้นผิวที่ถูกขัดสีเป็นลักษณะรอยไถและรอยเฉือน เหล็กหล่อเหนียวที่ชุบอสเทมเปอร์ที่ 360°C มีรอยขัดสีที่เป็นร่องลึกกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ชุบอสเทมเปอร์ที่ 280°C เนื่องจากการชุบอสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่าได้โครงสร้างพื้นเป็นออสเฟอไรต์ที่หยาบกว่า

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มนัส สติจินดา. เหล็กหล่อ. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, (2543).

- [2] P. J. Blau, "ASM Metals Handbook; Vol. 18- Friction, Lubrication, and Wear Technology," ASM International, pp. 337-351, 1992.
- [3] M. H. Sohi, M. N. Ahmadabadi, and A. B. Vahdat, "The role of austempering parameters on the structure and mechanical properties of heavy section ADI," *J. of Mater. Proc. Tech.*, vol. 153 - 154, pp. 203 - 208, 2004.
- [4] A. Vasko, "Chosen factors influencing microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron," *Mater. Eng.*, vol. 16, issue 4, pp. 11 - 14, 2009.
- [5] G. Francucci, J. Sikora, and R. Dommarco, "Abrasion resistance of ductile iron austempered by the two-step process," *Mater Sci Eng*, vol. A485, pp. 46 - 54, 2008.
- [6] Y. Sahin, M. Erdogan, and V. Kilicli, "Wear behaviour of austempered ductile irons with dual matrix structures," *Mater. Sci. Eng.*, vol. A444, pp. 31-38, 2007.
- [7] *Specification for Ferritic Ductile Iron Pressure-Retaining Castings for Use at Elevated Temperatures*, ASTM Standard A395/A395M - 99(2009), 2009.
- [8] J. Aranzabal, I. Gutierrez, J. M. Rodriguez - ibabe, and J. J. Urcola, "Influence of the amount and morphology of retained austenite on the mechanical properties of an austempered ductile iron," *Metall. and Mater. Trans.*, vol. 28A, pp. 1143 - 1156, 1997.
- [9] L. Quanshun, X. Jingpei, and S. Yanpei, "Effects of microstructures on the abrasive wear behaviour of spheroidal cast iron," *Wear*, vol. 184, pp. 1-10, 1999.